植物生态学报 2016, **40** (3): 0–0 doi: 10.17521/cjpe.2015.0193
Chinese Journal of Plant Ecology http://www.plant-ecology.com

浙江省森林生态系统碳储量及其分布特征

李 银[1,2] 陈国科[1] 林敦梅[3] 陈 彬[4] 高雷明[1] 简 兴[5] 杨 波[6] 徐武兵[1,2] 苏宏新[1] 赖江山[1] 王希华[7] 杨海波[7] 马克平[1*]

[1]中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093; [2]中国科学院大学, 北京 100049; [3]重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400044; [4]上海辰山植物园, 上海 200062; [5]安徽科技学院城建与环境学院, 安徽蚌埠 233300; [6]景德镇学院, 江西景德镇 333000; [7]华东师范大学生态与环境科学学院, 上海 200062

摘 要 利用2011–2012年野外标准地实测资料, 结合第八次全国森林资源清查资料, 研究了浙江省森林生态系统碳储量及其分布特征。结果表明: 浙江省森林生态系统碳储量为602.73 Tg, 其中乔木层、灌草层、凋落物层和土壤层碳储量分别为122.88 Tg、16.73 Tg、11.36 Tg和451.76 Tg, 分别占生态系统碳储量的20.39%、2.78%、1.88%和74.95%; 在各森林类型中, 阔叶混交林碳储量为138.03 Tg, 所占比例最大(22.90%); 在森林各龄组中, 幼、中龄林约占浙江省森林生态系统碳储量的70.66%, 是碳储量的主要贡献者。浙江省森林生态系统平均碳密度为120.80 $t·hm^{-2}$, 乔木层、灌草层、凋落物层和土壤层碳密度分别为24.65 $t·hm^{-2}$、3.36 $t·hm^{-2}$、2.28 $t·hm^{-2}$和90.51 $t·hm^{-2}$。浙江省森林生态系统土壤层碳储量和生态系统碳储量呈极显著相关关系, 说明土壤层碳储量对浙江省森林生态系统碳储量贡献较大。浙江省天然林乔木层碳密度整体表现为过熟林>成熟林>近熟林>中龄林>幼龄林, 而人工林乔木层碳密度表现为过熟林>近熟林>成熟林>中龄林>幼龄林。浙江省幼、中龄林林分面积比重较大, 占全省森林面积的76.76%, 若对现有森林进行更好的经营和管理, 可以增加浙江省森林的碳固存能力。

关键词 森林生态系统, 碳储量, 碳密度, 空间分布, 浙江省

引用格式: 李银, 陈国科, 林敦梅, 陈彬, 高雷明, 简兴, 杨波, 徐武兵, 苏宏新, 赖江山, 王希华, 杨海波, 马克平 (2016). 浙江省森林生态系统碳储量及其分布特征. 植物生态学报, 40, 1–1. doi: 10.17521/cjpe.2015.0193

Carbon storage and its distribution of forest ecosystems in Zhejiang Province

LI Yin[1,2], CHEN Guo-Ke[1], LIN Dun-Mei[3], CHEN Bin[4], GAO Lei-Ming[1], JIAN Xing[5], YANG Bo[6], XU Wu-Bing[1,2], SU Hong-Xin[1], LAI Jiang-Shan[1], WANG Xi-Hua[7], YANG Hai-Bo[7], and MA Ke-Ping[1*]

[1]State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China; [2]University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; [3]Key Laboratory of Eco-Environment of Three Gorges Reservior Region, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China; [4]Shanghai Chenshan Botanical Garden, Shanghai 200062, China; [5]College of Urban Construction and Environment, Anhui Science and Technology University, Bengbu, Anhui 233300, China; [6]Jingdezhen University, Jingdezhen, Jiangxi 333000, China; and [7]School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200062, China

Abstract

Aims The concentration of CO_2 and other greenhouse gases in the atmosphere has considerably increased over last century and is set to rise further. Forest ecosystems play a key role in reducing CO_2 concentration in the atmosphere and mitigating global climate change. Our objective is to understand carbon storage and its distribution in forest ecosystems in Zhejiang Province, China.

Methods By using the 8th forest resource inventory data and 2011–2012 field investigation data, we estimated carbon storage, density and its distribution in forest ecosystems of Zhejiang Province.

Important findings The carbon storage of forest ecosystems in Zhejiang Province was 602.73 Tg, of which 122.88 Tg in tree layer, 16.73 Tg in shrub-herb layer, 11.36 Tg in litter layer and 451.76 Tg in soil layer accounting for 20.39%, 2.78%, 1.88% and 74.95% of the total carbon storage, respectively. The carbon storage of mixed broadleaved forests was 138.03 Tg which ranked the largest (22.90%) among all forest types. The young and middle aged forests which accounted for 70.66% of the total carbon storage were the main body of carbon storage in Zhejiang Province. The carbon density of forest ecosystems in Zhejiang Province was 120.80 $t·hm^{-2}$ and that in tree layer, shrub-herb layer, litter layer and soil layer were 24.65 $t·hm^{-2}$, 3.36 $t·hm^{-2}$, 2.28 $t·hm^{-2}$ and 90.51 $t·hm^{-2}$, respectively. The significant relationship between soil organic carbon storage and forest ecosystem carbon storage

收稿日期Received: 2015-06-02 接受日期Accepted: 2015-11-27
* 通讯作者Author for correspondence (E-mail: kpma@ibcas.ac.cn)

indicates that soil carbon played an important role in shaping forest ecosystem carbon density. Carbon density of tree layer increased with age in natural forests, but decreased in the order over-mature > near-mature > mature > middle-aged > young forest in plantations. The proportions of young and middle aged forests were larger than any other age classes. Thereby, the carbon storage of forest ecosystems in Zhejiang Province could be increased through a proper forest management.

Key words forest ecosystem, carbon storage, carbon density, spatial distribution, Zhejiang Province

Citation: Li Y, Chen GK, Lin DM, Chen B, Gao LM, Jian X, Yang B, Xu WB, Su HX, Lai JS, Wang XH, Yang HB, Ma KP (2016). Carbon storage and its distribution of forest ecosystems in Zhejiang Province. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 1–1. doi: 10.17521/cjpe.2015.0193

自工业革命以来，化石燃料的大量燃烧加之土地利用的改变，导致大气中的CO_2浓度不断升高(Vitousek, 1994; Rind, 1999; Pope, 2006)。由此引起的全球气候变暖已成为广泛关注的热点问题之一(Norby & Luo, 2006)。陆地生态系统是地球生物圈三大碳库之一，在平衡和吸收大气CO_2中发挥着重要作用，是大气碳的主要汇(Schimel, 1995; 方精云等, 2001)。森林生态系统是陆地生态系统的主要碳库，储存了陆地生态系统地上碳库的80%、地下碳库的40% (Malhi *et al*., 1999)，在调节全球碳平衡以及减缓全球温室效应等方面起着不可替代的作用(刘国华等, 2000; Watson *et al*., 2000)。

目前，已对全球和区域水平的森林生态系统碳储量和碳密度开展了大量的研究(Simpson *et al*., 1993; Dixon *et al*., 1994; Asner *et al*., 2010; Pan *et al*., 2011)。我国也有不少学者发表了森林生态系统碳储量和碳密度的研究结果(刘国华等, 2000; 周玉荣等, 2000; 方精云等, 2001; Fang *et al*., 2001, 2007; 王效科等, 2001; 李克让等, 2003; 赵敏和周广胜, 2004;李海奎等, 2011; 刘双娜等, 2012)，但这些研究结果存在很大的差异，主要原因是植被类型多样，研究区域较复杂，估算方法和基础数据存在差异(刘国华等, 2000; 吕超群和孙书存, 2004)。同时，以上大部分研究主要针对乔木层，而对林下灌草、凋落物以及土壤碳储量和碳密度的关注较少。如果按植被类型、区域进行多组分的详尽统计，利用最新森林调查资料，可以提高森林生态系统碳储量的估计精度。

目前已开展一系列有关浙江省森林碳储量和碳密度的研究，如刘其霞等(2005)、Zhang等(2007)和张骏等(2010)利用野外样地调查资料估算了浙江省生态公益林碳密度和碳储量，张茂震和王广兴(2008)以及张茂震等(2009)基于森林清查资料研究了浙江省森林生物量和生产力，张峰等(2012)基于地统计学和森林资源连续清查(CFI)样地研究了浙江省森林碳空间分布：以上研究主要针对浙江省某些特定的林分类型或者基于清查资料的地上植被碳密度和碳储量，而缺乏有关浙江省不同森林生态系统碳储量和碳密度及其空间分布的较为全面系统的研究。本文以浙江省森林生态系统为研究对象，利用2011–2012年野外标准地实测资料，结合第八次全国森林资源清查资料，估算各组分的碳储量和碳密度，旨在全面了解浙江省的碳储量及碳密度现状，为区域碳汇的评估和制定科学合理的森林固碳政策提供基础数据和科学依据。

1 研究地区和研究方法

1.1 研究区概况

浙江省位于我国东南沿海长江三角洲南翼，属于亚热带季风湿润气候，日照充足，热量丰富，降水充沛，雨热同季，冬夏季交替明显。浙江省年平均气温为15–18 ℃，年降水量为980–2 000 mm，年日照时数为1 710–2 100 h。地势西南部高，东北部低，自西南向东北倾斜，呈梯级下降；东北部为长江三角洲冲积平原，中部多为丘陵地区，西南部多为山区，平均海拔800 m。全省最高海拔1 929 m。土壤类型主要为红壤、红黄壤和黄壤，还有少量的石灰土、紫色土等(张茂震等, 2009)。

浙江省森林群落类型丰富，主要有常绿阔叶林、常绿落叶阔叶混交林、山地矮林，此外还有落叶阔叶林、针叶林和竹林等多种植被类型。根据第八次全国森林资源连续清查成果数据，浙江省森林覆盖率达到59.07%，森林面积601.36万hm^2，其中乔木林面积410.07万hm^2，经济林面积107.95万hm^2，竹林面积83.34万hm^2。

1.2　研究方法

1.2.1　样地设置

本研究采用的森林资源数据源于2009年国家第八次森林资源清查浙江省的汇总数据。森林资源数据包含有样地的地理信息、林地信息、森林类型、林龄、各森林类型面积和蓄积量等。本研究中只包括乔木林和竹林的碳储量和碳密度数据, 不包括经济林的碳储量和碳密度数据。

由于全国森林资源清查资料中只有乔木层的相关数据, 而没有林下植被(灌木和草本)、凋落物和土壤的相关数据, 本研究于2011–2012年, 在浙江省按照典型取样的方法, 根据浙江省森林资源清查资料中主要森林类型各龄组的面积和蓄积量比重, 设置各类型森林的调查样地, 设置面积不小于20 m × 30 m的阔叶混交林42个、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林24个、马尾松(*Pinus massoniana*)林34个、针阔混交林60个、针叶混交林8个、软阔林6个、硬阔林18个、栎类(*Quercus* spp.)林8个、木荷(*Schima superba*)林16个、樟(*Cinnamomum camphora*)林3个、柳杉(*Cryptomeria fortune*)林6个、其他松类林3个和竹林12个, 共240个标准样地。样地调查指标包括地理位置、海拔高度、坡向、坡位、坡度、树种组成、胸径、树高、林龄、郁闭度、灌木和草本层的物种组成及覆盖度、土壤容重和土壤剖面等特征。由于本研究中没有设置柏木(*Cupressus funebris*)林样地, 其林下灌草层、凋落物层和土壤层碳密度为所有针叶树种样地相应层次的平均值。将标准样地划分为10 m × 10 m的小样方, 调查各样方内所有乔木个体, 鉴别物种名, 测定其胸径和树高。在样地中, 对优势树种按大、中、小径级选择3–5株样木, 按叶、枝、干、根取样, 同器官混合形成一个样品, 每个样品鲜质量300 g左右, 带回实验室, 烘干, 测定乔木树种各器官的碳含量。乔木树种各器官碳含量采用重铬酸钾-硫酸氧化法(刘光崧等, 1996)测定。

1.2.2　乔木层碳密度的估算

乔木层生物量采用生物量-蓄积量转换关系法(刘国华等, 2000; Fang *et al.*, 2001, 2007; 曾伟生, 2005)进行估算, 具体估算公式如下:

$$B = aV + b \quad (1)$$

式中B、V分别为各森林类型单位面积生物量($t \cdot hm^{-2}$)和单位面积蓄积量($m^3 \cdot hm^{-2}$), a和b为相应的生物量-蓄积量转换参数, 各森林类型的转换参数见表1。

将森林清查资料中各森林类型的单位面积蓄积量代入式(1)中, 求出单位面积生物量, 然后乘以对应森林类型乔木碳含量即为各森林类型的乔木层碳密度。由于竹林没有生物量-蓄积量转换模型, 采用单株平均生物量与总株数之积估算竹林生物量, 单株平均生物量取10.44 kg (张茂震等, 2009)。各森林类型乔木层碳含量采用本研究实测乔木层优势树种各器官碳含量的加权平均值(基于各器官所占乔木生物量的比例)。

1.2.3　林下灌木、草本和凋落物碳密度估算

在各森林类型样地中随机设置3个2 m × 2 m的灌木样方, 共计405个, 记录样方内的物种及其盖

表1　各森林类型林分生物量-蓄积量转换方程
Table 1　Biomass-volume conversion formula for different forest types

森林类型 Forest type	a	b	n	R^2	参考文献 Reference
马尾松林 *Pinus massoniana* forest	0.503 4	20.547	52	0.87	Fang *et al.*, 2007
其他松类林 Other pines and conifer forests	0.516 8	33.238	19	0.86	Fang *et al.*, 2007
杉木林 *Cunninghamia lanceolata* forest	0.465 2	19.141	90	0.94	Fang *et al.*, 2007
柳杉林、水杉林 *Cryptomeria fortunei, Metasequoia glyptostroboides* forests	0.415 8	41.331 8	30	0.79	Fang *et al.*, 2001
柏木林 *Cupressus funebris* forest	0.612 9	46.145 1	19	0.87	Fang *et al.*, 2001
栎类林 *Quercus* spp. forest	1.145 3	8.547 3	12	0.98	Fang *et al.*, 2001
木荷林、樟林 *Schima superba, Cinnamomum camphora* forests	1.035 7	8.059 1	17	0.89	Fang *et al.*, 2001
硬阔林 Hardwood forest	1.178 3	2.558 5	17	0.95	Fang *et al.*, 2007
软阔林 Softwood forest	0.475 4	30.603	16	0.92	Liu *et al.*, 2000
针叶混交林 Mixed coniferous forest	0.589 4	24.515 1			Zeng, 2005
阔叶混交林 Mixed broadleaved forest	0.978 8	5.376 4	35	0.93	Fang *et al.*, 2007
针阔叶混交林 Mixed coniferous and broadleaved forest	0.813 6	18.466	10	0.99	Fang *et al.*, 2001

a, 回归方程的常数($t \cdot m^{-3}$); b, 回归方程的常数($t \cdot hm^{-2}$); n, 回归方程中所使用的样本数; R^2, 回归方程的决定系数。
a, a constant in the regression model ($t \cdot m^{-3}$); b, a constant in the regression model ($t \cdot hm^{-2}$); n, number of trees used in developing the regression model; R^2, coefficient of determination in the regression model.

doi: 10.17521/cjpe. 2015.0193

度，然后将样方内所有灌木全部收获，分根、枝干、叶称质量，分别取约300 g样品称鲜质量。在灌木调查样方内，设置1个1 m × 1 m的草本样方，共计300个，记录样方内物种及其盖度，然后收获样方内全部草本，分地上和地下部分称量，并分别取约300 g样品称鲜质量。在乔木样方中，选择代表地段，设置3个1 m × 1 m的小样方，共计701个，收集样方内的所有凋落物并称量，取其混合样品约300 g称鲜质量。将样地所采集的灌木、草本和凋落物样品带回实验室，65 ℃恒温烘干至恒质量，推算灌木、草本和凋落物的含水率，根据含水率推算其生物量，进而推算生物量密度。取灌木、草本和凋落物烘干样品，采用重铬酸钾-硫酸氧化法分别测定其碳含量(刘光崧等, 1996)。灌木、草本和凋落物生物量密度乘以其相应的碳含量得到碳密度。

1.2.4 土壤层碳密度估算

在灌木样方内设置一个土壤剖面，各森林类型中阔叶混交林37个、杉木林24个、马尾松林33个、针阔混交林51个、针叶混交林3个、软阔林6个、硬阔林12个、栎类林5个、木荷林12个、樟林3个、柳杉林3个、其他松类林3个、竹林9个，共设置剖面201个，每个剖面分为:I层(0–10 cm)、II层(10–20 cm)、III层(20–30 cm)、IV层(30–50 cm)和V层(50–100 cm)，分层取样(不足1 m的取至基岩层，碳密度按0计算)，用环刀法测定土壤容重。在灌木样方内，利用土钻，按I层(0–10 cm)、II层(10–20 cm)、III层(20–30 cm)、IV层(30–50 cm)和V层(50–100 cm)，每层随机钻取3–5钻土，去除石砾和杂物，合并成一个混合样。同一样地3个灌木样方的同层土样组成该层土壤混合样品。土壤样品用塑料自封袋密封，带回实验室，风干、研磨、过20目和100目筛后待测定，土壤各层次的碳含量采用重铬酸钾-硫酸氧化法测定(刘光崧等, 1996)。各森林类型土壤有机碳含量垂直分布特征见表2。各森林类型土壤碳密度的计算公式为:

$$SOC = \sum_{i=1}^{n} B_i \times C_i \times (1 - G_i) \times H_i / 10$$

式中，SOC为各森林类型土壤有机碳密度(t·hm^{-2})，B_i为第i层土壤容重(g·cm^{-3})，C_i为第i层土壤碳含量(g·kg^{-1})，H_i为第i层土壤的厚度(cm)，G_i为第i层直径大于2 mm的砾石质量分数(%)。

1.2.5 森林生态系统碳储量计算

利用植被类型外推法估算浙江省各森林类型灌木层、草本层、凋落物层和土壤层碳储量 (周玉荣等, 2000; 王新闯等, 2011)，估算公式如下:

$$SOC_i = C_i \times S_i \quad (2)$$

式中，SOC_i为浙江省第i类型森林灌草层、凋落物层和土壤层碳储量；C_i为第i类型森林灌草层、凋落物层和土壤层碳密度；S_i为第i类型森林面积。

2 结果

2.1 浙江省森林生态系统碳储量分布特征

浙江省森林生态系统平均碳密度为120.80 t·hm^{-2},

表2 浙江省不同森林类型土壤有机碳含量垂直分布(平均值±标准偏差)

Table 2 Vertical distribution of soil organic carbon content of different forest types in Zhejiang Province (mean ± *SD*)

森林类型 Forest type	土壤深度 Soil depth (cm)				
	0–10 cm	10–20 cm	20–30 cm	30–50 cm	50–100 cm
樟林 *Cinnamomum camphora* forest	28.83 ± 1.09	11.41 ± 0.87	9.47 ± 2.35	6.50 ± 1.30	4.37 ± 0.26
柳杉林 *Cryptomeria fortunei* forest	31.13 ± 3.21	21.77 ± 1.89	17.31 ± 2.41	9.91 ± 1.48	8.32 ± 0.17
软阔林 Softwood forest	18.28 ± 9.74	14.26 ± 8.71	14.10 ± 8.11	12.11 ± 6.32	13.30 ± 2.74
柏木林 *Cupressus funebris* forest	35.21 ± 10.67	19.76 ± 7.57	11.09 ± 3.57	7.23 ± 2.27	7.72 ± 4.50
硬阔林 Hardwood forest	23.72 ± 5.73	11.55 ± 4.58	7.57 ± 2.60	5.82 ± 1.93	4.33 ± 1.67
木荷林 *Schima superba* forest	16.74 ± 2.37	10.72 ± 2.61	8.83 ± 1.23	5.45 ± 0.56	4.15 ± 0.43
其他松类林 Other pines and conifer forests	20.97 ± 8.21	14.20 ± 5.49	8.97 ± 5.09	6.26 ± 0.68	5.93 ± 0.80
栎类林 *Quercus* spp. forest	20.29 ± 3.32	10.08 ± 2.05	6.04 ± 1.71	5.36 ± 0.41	4.35 ± 0.37
针叶混交林 Mixed coniferous forest	19.82 ± 9.37	10.05 ± 3.91	7.74 ± 3.09	5.63 ± 1.96	5.29 ± 2.97
针阔叶混交林 Mixed coniferous and broadleaved forest	16.22 ± 9.53	8.84 ± 6.06	6.42 ± 4.57	5.16 ± 3.59	4.26 ± 2.51
马尾松林 *Pinus massoniana* forest	21.34 ± 5.97	13.01 ± 3.83	9.27 ± 2.64	7.64 ± 2.73	6.19 ± 2.62
杉木林 *Cunninghamia lanceolata* forest	14.11 ± 2.92	9.17 ± 1.73	8.07 ± 4.89	4.78 ± 1.86	4.02 ± 1.21
竹林 Bamboo forest	28.76 ± 10.83	14.42 ± 5.77	9.97 ± 3.71	7.31 ± 2.99	5.60 ± 2.40

其中乔木层、灌草层、凋落物层和土壤层碳密度分别为24.65 t·hm^{-2}、3.36 t·hm^{-2}、2.28 t·hm^{-2}和90.51 t·hm^{-2} (表3)。在乔木层中，柏木林碳密度最大，为47.95 t·hm^{-2}；樟林碳密度最小，为17.57 t·hm^{-2}。在灌草层中，针叶混交林碳密度最大，为6.82 t·hm^{-2}；柳杉林碳密度最小，为0.86 t·hm^{-2}，前者碳密度是后者的8倍。在凋落物层中，针叶混交林的碳密度最大，为3.67 t·hm^{-2}；竹林碳密度最小，为0.63 t·hm^{-2}。在土壤层中，柳杉林的碳密度最大，为155.83 t·hm^{-2}；竹林碳密度最小，为71.63 t·hm^{-2}。生态系统碳密度柳杉林最大，为204.15 t·hm^{-2}；竹林碳密度最小，为96.98 t·hm^{-2} (表3) 。

浙江省森林生态系统碳储量为602.73 Tg，其中乔木层、灌草层、凋落物层和土壤层碳储量分别为122.88 Tg、16.73 Tg、11.36 Tg和451.76 Tg，分别占生态系统碳储量的20.39%、2.78%、1.88%和74.95% (表3)。土壤层和乔木层碳储量之和占浙江省森林生态系统碳储量的95.34%，是浙江省森林生态系统的主要碳库。阔叶混交林、杉木林、马尾松林和竹林碳储量分别占浙江省森林生态系统碳储量的22.90%、17.09%、14.73%和14.21%，是浙江省森林生态系统碳储量的主要贡献者，这主要是因为这4类森林面积较大，共占全省森林面积的70.60% (表3)。

2.2 浙江省各森林类型乔木层各龄组碳储量

浙江省天然乔木层碳密度整体表现为过熟林>成熟林>近熟林>中龄林>幼龄林(表4；图1A)，而人工林乔木层碳密度整体表现为过熟林>近熟林>成熟林>中龄林>幼龄林(表5；图1A)；同一龄组的碳密度，除近熟林外，均表现为天然林乔木层大于人工林(图1A)，说明天然林较人工林有更强的碳储存能力。在天然林中，除阔叶混交林表现为中龄林碳密度最大外，其他各森林类型碳密度均表现为随林龄增加而增加；栎类中龄林碳密度在浙江省各森林类型各龄组乔木层中最大，为97.51 t·hm^{-2}，杉木幼龄林碳密度最小，为11.12 t·hm^{-2} (表4) 。在人工林中，杉木乔木层碳密度表现为过熟林>近熟林>成熟林>中龄林>幼龄林，柳杉林乔木层碳密度表现为过

表3 浙江省森林生态系统碳储量和碳密度(平均值±标准偏差)
Table 3 Carbon storage and density of forest ecosystems in Zhejiang Province (mean ± *SD*)

森林类型 Forest type	面积 Area (100 hm^2)	碳密度 Carbon density (t·hm^{-2})					生态系统碳储量 Forest ecosystem carbon storage (Tg)	样本数 Sample number
		乔木层 Tree layer	灌草层 Shrub-herb layer	凋落物层 Litter layer	土壤层 Soil layer	森林生态系统 Forest ecosystem		
樟林 *Cinnamomum camphora* forest	24	17.57	3.07 ± 1.94	3.47 ± 0.84	86.37 ± 3.01	110.48	0.27	3
柳杉林 *Cryptomeria fortunei* forest	167	46.04	0.86 ± 0.07	1.42 ± 0.58	155.83 ± 6.53	204.15	3.41	6
软阔林 Softwood forest	216	19.15	1.70 ± 0.37	0.95 ± 0.41	147.61 ± 18.21	169.42	3.66	6
柏木林 *Cupressus funebris* forest	240	47.95	4.06 ± 1.03	2.48 ± 0.96	98.30 ± 16.24	152.79	3.67	5
硬阔林 Hardwood forest	671	23.08	1.84 ± 0.88	2.13 ± 0.69	115.92 ± 26.93	142.97	9.59	18
木荷林 *Schima superba* forest	744	30.91	3.41 ± 1.35	2.66 ± 1.06	81.09 ± 27.44	118.07	8.78	16
其他松类林 Other pines and conifer forests	1 366	29.42	5.14 ± 1.63	2.63 ± 1.82	71.66 ± 7.63	108.84	14.87	3
栎类林 *Quercus* spp. forest	2 030	23.38	2.55 ± 1.64	2.08 ± 0.55	109.19 ± 6.94	137.20	27.85	8
针叶混交林 Mixed coniferous forest	3 520	29.42	6.82 ± 1.35	3.67 ± 2.01	84.64 ± 7.62	124.55	43.84	8
针阔叶混交林 Mixed coniferous and broadleaved forest	5 676	28.15	3.89 ± 1.54	2.77 ± 1.25	90.81 ± 31.41	125.62	71.30	60
马尾松林 *Pinus massoniana* forest	8 116	21.61	5.38 ± 1.78	2.00 ± 1.20	80.40 ± 44.30	109.39	88.78	34
杉木林 *Cunninghamia lanceolata* forest	8 209	21.72	2.11 ± 0.83	2.68 ± 1.09	98.96 ± 27.14	125.47	103.00	24
竹林 Bamboo forest	8 834	23.78	0.94 ± 0.08	0.63 ± 0.19	71.63 ± 18.17	96.98	85.67	12
阔叶混交林 Mixed broadleaved forest	10 028	25.10	3.43 ± 0.89	2.88 ± 1.86	106.24 ± 27.30	137.65	138.03	42
加权平均值 Weighted average (t·hm^{-2})		24.65	3.36	2.28	90.51	120.80		
合计 Total (Tg)	49 841	122.88	16.73	11.36	451.76		602.73	
各层碳储量占总碳储量的比例 The corresponding proportions of carbon storage in different layers (%)		20.39	2.78	1.88	74.95		100.00	

乔木层碳储量数据来源于森林资源清查资料，而灌草层、凋落物层和土壤层碳储量数据来源于野外实测数据。
The carbon storage in the tree layer was estimated by forest resources inventory data, and that in the shrub-herb layer, litter layer and soil layer were estimated by field investigation data.

doi: 10.17521/cjpe. 2015.0193

表4 浙江省天然林乔木层各龄组碳储量和碳密度
Table 4 Carbon storage and density of tree layer for different age natural forests in Zhejiang Province

森林类型 Forest type	幼龄林 Young forest		中龄林 Middle-aged forest		近熟林 Near-mature forest		成熟林 Mature forest		过熟林 Over-mature forest	
	碳密度 Carbon density ($t \cdot hm^{-2}$)	碳储量 Carbon storage (Tg)	碳密度 Carbon density ($t \cdot hm^{-2}$)	碳储量 Carbon storage (Tg)	碳密度 Carbon density ($t \cdot hm^{-2}$)	碳储量 Carbon storage (Tg)	碳密度 Carbon density ($t \cdot hm^{-2}$)	碳储量 Carbon storage (Tg)	碳密度 Carbon density ($t \cdot hm^{-2}$)	碳储量 Carbon storage (Tg)
其他松类林 Other pines and conifer forests	17.72	0.21	31.00	0.59	44.52	1.18				
马尾松林 *Pinus massoniana* forest	15.06	2.09	22.05	7.92	27.13	4.94	43.74	1.05		
杉木林 *Cunninghamia lanceolata* forest	11.12	0.29	16.14	1.27	20.28	1.21	24.55	0.94	39.33	0.09
栎类林 *Quercus* spp. forest	21.95	4.35	97.51	0.22						
木荷林 *Schima superba* forest	18.82	0.59	40.48	1.46	72.19	0.17				
硬阔林 Hardwood forest	19.45	0.89	38.93	0.46						
软阔林 Softwood forest					16.75	0.08	22.45	0.11		
针叶混交林 Mixed coniferous forest	15.32	0.37	25.36	2.73	36.70	1.76	39.45	0.95	65.74	0.16
阔叶混交林 Mixed broadleaved forest	21.54	18.36	45.17	5.61	43.03	0.20	30.53	0.15		
针阔叶混交林 Mixed coniferous and broadleaved forest	22.33	4.60	31.15	6.71	46.84	2.58	37.99	0.36		
加权平均值 Weighted average ($t \cdot hm^{-2}$)	20.69		28.27		31.64		33.69		52.54	
合计 Total (Tg)		31.75		26.98		12.05		3.45		0.25

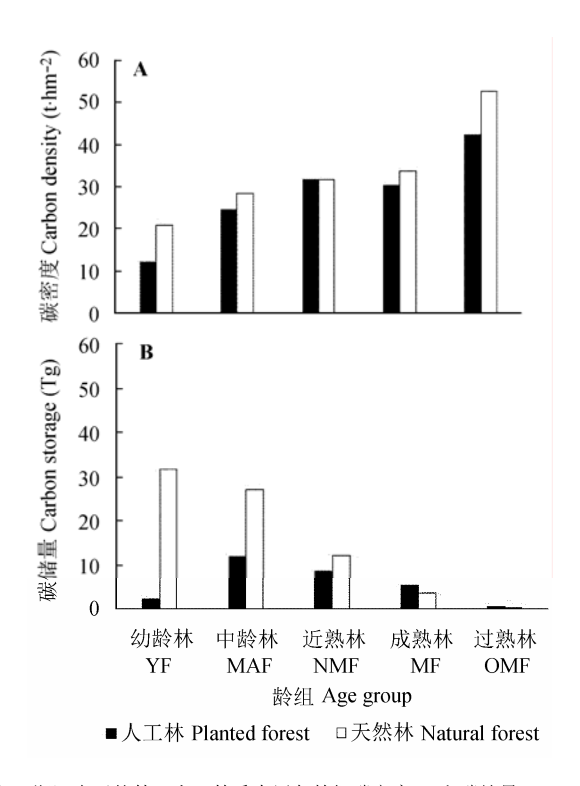


图1 浙江省天然林、人工林乔木层各龄组碳密度(**A**)和碳储量(**B**)。
Fig. 1 Carbon density (**A**) and carbon storage (**B**) of tree layer for different age natural and planted forests in Zhejiang Province. YF, MAF, NMF, MF, OMF refer to young forest, middle-aged forest, near-mature forest, mature forest, and over-mature forest, respectively.

熟林>成熟林>幼龄林>近熟林, 阔叶混交林表现为中龄林>近熟林>幼龄林, 针阔叶混交林表现为近熟林>成熟林>中龄林>幼龄林, 其他林分类型表现为碳密度随林龄增加而增加(表5)。

浙江省天然林乔木层主要为幼龄林和中龄林, 占全省天然林乔木碳储量的78.86%, 其中幼龄林碳储量最高, 为31.75 Tg; 中龄林次之, 为26.98 Tg (表4)。人工林乔木层主要以中龄林和近熟林为主, 占全省人工林乔木层碳储量的71.44%; 其中中龄林碳储量最高, 为11.96 Tg; 过熟林最低, 为0.50 Tg (表5)。浙江省天然林乔木层碳储量(74.48 Tg)远高于人工林乔木层碳储量(28.41 Tg), 前者是后者的2.62倍, 说明天然林是浙江省碳储量的主要贡献者(图1B)。

2.3 浙江省森林生态系统各组分碳储量相关性分析

浙江省森林生态系统乔木层碳储量与灌草层和土壤层碳储量相关性不显著, 与森林生态系统碳储量呈显著正相关关系($p < 0.05$), 而与凋落物层碳储量呈负相关关系; 灌草层碳储量与凋落物碳储量呈极显著正相关关系($p < 0.01$), 而与土壤层和森林生态系统碳储量呈负相关关系; 凋落物层碳储量与土壤层和森林生态系统碳储量的相关性不显著; 土壤层碳储量与森林生态系统碳储量呈极显著相关关系($p < 0.01$), 且相关性系数较大, 说明土壤层碳储量对整个森林生态系统碳储量的贡献最大(表6)。

3 讨论

3.1 浙江省森林生态系统碳储量在全国的地位

森林生态系统在固定和平衡大气中的CO_2、减缓全球气候变化中起着重要作用。周玉荣等(2000)通

表5　浙江省人工林乔木层各龄组碳储量和碳密度
Table 5　**C**arbon storage and density of tree layer for different age planted forests in Zhejiang Province

森林类型 Forest type	幼龄林 Young forest		中龄林 Middle-aged forest		近熟林 Near-mature forest		成熟林 Mature forest		过熟林 Over-mature forest	
	碳密度 Carbon density ($t{\cdot}hm^{-2}$)	碳储量 Carbon storage (Tg)	碳密度 Carbon density ($t{\cdot}hm^{-2}$)	碳储量 Carbon storage (Tg)	碳密度 Carbon density ($t{\cdot}hm^{-2}$)	碳储量 Carbon storage (Tg)	碳密度 Carbon density ($t{\cdot}hm^{-2}$)	碳储量 Carbon storage (Tg)	碳密度 Carbon density ($t{\cdot}hm^{-2}$)	碳储量 Carbon storage (Tg)
其他松类林 Other pines and conifer forests	17.07	0.37	24.63	1.01	32.45	0.54				
马尾松林 *Pinus massoniana* forest	11.20	0.16	18.18	0.78	20.37	0.88	42.05	0.30		
杉木林 *Cunninghamia lanceolata* forest	9.87	0.78	22.16	5.78	31.76	4.64	26.63	3.18	35.09	0.33
柳杉林 *Cryptomeria fortunei* forest	30.06	0.14			26.83	0.06	48.62	0.35	71.35	0.17
柏木林 *Cupressus funebris* forest			45.89	0.88	54.98	0.26				
栎类林 *Quercus* spp. forest			41.07	0.10						
樟林 *Cinnamomum camphora* forest	16.75	0.04								
木荷林 *Schima superba* forest	3.99	0.01	38.48	0.09						
硬阔林 Hardwood forest	6.12	0.06								
软阔林 Softwood forest	16.03	0.08	17.40	0.13						
针叶混交林 Mixed coniferous forest	12.29	0.09	29.49	1.84	36.58	1.57	36.71	1.23		
阔叶混交林 Mixed broadleaved forest	18.85	0.11	44.54	0.21	38.20	0.18				
针阔叶混交林 Mixed coniferous and broadleaved forest	13.55	0.29	25.14	1.02	44.26	0.42	32.32	0.31		
加权平均值 Weighted average ($t{\cdot}hm^{-2}$)	12.20		24.48		31.68		30.35		42.40	
合计 Total (Tg)		2.13		11.84		8.57		5.37		0.50

表6　浙江省森林生态系统各组分碳储量相关性分析
Table 6　Correlation analysis among carbon storage of different carbon pools of forest ecosystem in Zhejiang Province

	乔木层 Tree layer	灌草层 Shrub-herb layer	凋落物层 Litter layer	土壤层 Soil layer	森林生态系统 Forest ecosystem
乔木层 Tree layer	1	0.048	–0.021	0.226	0.530*
灌草层 Shrub-herb layer		1	0.679**	–0.560*	–0.416
凋落物层 Litter layer			1	–0.411	–0.311
土壤层 Soil layer				1	0.942**
森林生态系统 Forest ecosystem					1

*, 显著相关($p < 0.05$); **, 极显著相关($p < 0.01$)。
*, correlation is significant at $p < 0.05$ level; **, correlation is significant at $p < 0.01$ level.

过广泛收集资料得到我国森林生态系统碳储量为281.16 × 10^8 t, 其中植被碳储量为62.00 × 10^8 t, 凋落物碳储量为8.92 × 10^8 t, 土壤碳储量为210.23 × 10^8 t。本研究通过野外实际调查结合全国第八次森林资源清查数据, 估算得到浙江省森林生态系统碳储量为620.73 Tg, 约占全国森林生态系统碳储量的2.14%, 低于陕西省的790.75 Tg (崔高阳等, 2015)和吉林省的1 820.413 Tg (王新闯等, 2011)。浙江省森林生态系统碳密度为120.80 $t{\cdot}hm^{-2}$, 低于我国森林生态系统平均碳密度258.83 $t{\cdot}hm^{-2}$ (周玉荣等, 2000), 也低于吉林省的225.30 $t{\cdot}hm^{-2}$ (王新闯等, 2011)、陕西省的123.70 $t{\cdot}hm^{-2}$ (崔高阳等, 2015)和海南省的163.7 $t{\cdot}hm^{-2}$ (Ren *et al*., 2014)。浙江省森林生态系统碳密度低于以上省份, 主要是因为幼、中龄林在全省森林面积中所占比重较大。根据第八次全国森林资源清查资料数据, 浙江省幼、中龄林面积占全省森林面积的76.76%。浙江省在新中国成立以前山林遭到严重破坏, 新中国成立后虽进行了大规模的封山育林、造林, 但改革开放以后, 浙江省经济高速发展, 森林采伐消耗较大, 森林处于恢复期, 普遍林龄较小(刘其霞等, 2005)。然而从另一个角度来看, 虽然幼、中龄林比例大, 但其生长速度快, 经过合理的森林经营管理, 这部分森林碳密度会逐渐增大, 从而提高浙江省森林生态系统的碳固定能力。

3.2　浙江省森林生态系统碳储量的分配特征

森林土壤碳库作为森林生态系统最大的碳库, 在维持森林生态系统碳平衡和碳循环方面起着关键

doi: 10.17521/cjpe. 2015.0193

作用。周玉荣等(2000)针对全国森林生态系统碳储量的研究表明, 土壤碳库约为植被碳库的3.39倍。李克让等(2003)通过CEVSA模型估算, 我国森林生态系统土壤碳库约为植被碳库的2.62倍。本研究结果表明, 浙江省森林生态系统土壤碳库约为植被碳库的3.23倍, 与周玉荣等(2000)的研究结果相近。

森林凋落物是森林生态系统的重要组成部分之一, 是森林土壤有机碳和养分的重要来源, 对于林地土壤肥力的维护和森林生产力的提高具有重要作用。据估计, 全球通过凋落物分解归还到土壤的有机碳约为50 $Pg \cdot a^{-1}$ (彭少麟和刘强, 2002)。我国森林生态系统凋落物层平均碳密度为8.21 $t \cdot hm^{-2}$ (周玉荣等, 2000)。吉林省森林生态系统凋落物层平均碳密度为5.64 $t \cdot hm^{-2}$ (王新闯等, 2011)。本研究结果显示: 浙江省森林生态系统凋落物层平均碳密度低于全国平均碳密度和吉林省凋落物层碳密度, 这主要因为凋落物的现存量很大程度依赖于所处区域的水热条件、地域特点, 一般随水热因子的改善而减小(周玉荣等, 2000)。

本研究表明, 浙江省林下灌草层的碳储量和碳密度(表3)都高于吉林省灌草层碳储量(5.20 Tg)和碳密度(0.64 $t \cdot hm^{-2}$) (王新闯等, 2011), 以及陕西省灌草层碳储量(9.06 Tg)和碳密度(1.42 $t \cdot hm^{-2}$) (崔高阳等, 2015), 说明浙江省林下灌草具有较强的固碳能力。以往众多基于森林资源清查资料在全国或区域尺度上的森林生态系统碳储量的研究多针对乔木层和土壤层, 而对林下植被和凋落物的研究不多。实际上, 当乔木层郁闭度较低时, 林下植被生长较好, 特别是在南方水热条件较好, 林下植物丰富时, 忽略其生物量, 将低估森林碳储量。

3.3 估算方法对森林生态系统碳储量估算的影响

目前国内已开展了大量区域或者全国尺度上森林生态系统碳储量的研究, 由于估算方法不同, 森林碳储量的估算还存在很大的不确定性(周玉荣等, 2000; Fang *et al*., 2001; 王效科等, 2001; 李克让等, 2003; Pan *et al*., 2004)。基于1989–1993年全国森林资源清查资料, Pan等(2004)利用我国不同森林类型分龄组的森林生物量估算模型估算的中国森林乔木碳储量为4 020.00 Tg, 而方精云等(2001)利用未考虑林龄的蓄积量-生物量方程估算的结果为4 630.00 Tg, 后者比前者高估了610.00 Tg。基于全国第七次资源清查资料, 李海奎等(2011)利用不同树种的生物量经验模型估算了中国森林植被碳储量, 其中吉林省乔木碳储量为513.26 Tg, 而王新闯等(2011)利用Pan等(2004)建立的模型估算的结果为439.15 Tg, 李海奎和雷渊才(2010)利用方精云等建立的模型估计得到吉林省乔木碳储量为494.47 Tg (表7)。从以上分析可以看出, 不同的森林生物量估算方法给森林植被碳储量的估算带来了很大的不确定性。未来在进行国家及区域尺度碳循环研究时, 应加强对各种估算方法的评价筛选, 采用统一合理的方法进行碳储量的估算, 以减少估算方法带来的不确定性。

本研究利用2011–2012年野外标准地实测资料, 结合第八次全国森林资源清查资料, 研究了浙江省森林生态系统碳储量、碳密度及其各组分的空间分布特征, 为评价浙江省森林的碳汇潜力提供了基础数据, 但森林碳储量的估算精度仍有进一步提高的可能性。蓄积量-生物量转换模型对森林碳储量估算精度影响很大, 本研究采用的没有考虑林龄的蓄积量-生物量模型可能会在一定程度上高估森林碳储量, 因而在建立不同林分类型蓄积量-生物量模型时, 应尽可能考虑区域性和林龄。同时, 某些森林类型由于没有建立相应的蓄积量-生物量模型而采用相似树种模型, 降低了森林碳储量的估算精度。

表7 不同估算方法估算森林植被碳储量
Table 7 Estimation of forest carbon storage by using different biomass estimation models

研究区域 Study area	估算方法 Biomass estimation model	植被碳储量 Forest carbon storage (Tg)	资料来源 Reference
中国 China	分龄组森林蓄积量-生物量转换模型 Age-based volume-to-biomass method	4 020.00	Pan *et al*., 2004
中国 China	不分龄组森林蓄积量-生物量转换模型 Volume-to-biomass method	4 630.00	Fang *et al*., 2001
吉林省 Jilin Province, China	分龄组森林蓄积量-生物量转换模型 Age-based volume-to-biomass method	439.14	Wang *et al*., 2011
吉林省 Jilin Province, China	不分龄组森林蓄积量-生物量转换模型 Volume-to-biomass method	494.47	Li & Lei, 2010
吉林省 Jilin Province, China	生物量经验模型 Biomass regression model	513.26	Li *et al*., 2011

基金项目　中国科学院战略性先导科技专项(XDA-05050204)。

致谢　感谢中国科学院植物研究所郦艳红和刘晓娟以及西南林业大学徐远杰等的帮助。

参考文献

Asner GP, Powell GVN, Mascaro J, Knapp DE, Clark JK, Jacobson J, Kennedy-Bowdoin T, Balaji A, Paez-Acosta G, Victoria E, Secada L, Valqui M, Hughes RF (2010). High-resolution forest carbon stocks and emissions in the Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107, 16738–16742.

Cui GY, Chen YM, Cao Y, An CC (2015). Analysis on carbon stock distribution patterns of forest ecosystems in Shaanxi Province. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39, 333–342. (in Chinese with English abstract) [崔高阳, 陈云明, 曹扬, 安淳淳 (2015). 陕西省森林生态系统碳储量分布格局分析. 植物生态学报, 39, 333–342.]

Dixon RK, Solomon AM, Brown S, Houghton RA, Trexier MC, Wisniewski J (1994). Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 263, 185–190.

Fang JY, Chen AP, Peng CH, Zhao SQ, Ci LJ (2001). Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 292, 2320–2322.

Fang JY, Guo ZD, Piao SL, Chen AP (2007). Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981–2000. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 50, 1341–1350.

Fang JY, Piao SL, Zhao SQ (2001). The carbon sink: The role of the middle and high latitudes terrestrial ecosystems in the northern hemisphere. *Acta Phytoecologica Sinica*, 25, 594–602. (in Chinese with English abstract) [方精云, 朴世龙, 赵淑清 (2001). CO_2失汇与北半球中高纬度陆地生态系统的碳汇. 植物生态学报, 25, 594–602.]

Li HK, Lei YC (2010). *Estimation and Evaluation of Forest Biomass Carbon Storage in China*. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [李海奎, 雷渊才 (2010). 中国森林植被生物量和碳储量评估. 中国林业出版社, 北京.]

Li HK, Lei YC, Zeng WS (2011). Forest carbon storage in China estimated using forestry inventory data. *Scientia Silvae Sinicae*, 47(7), 7–12. (in Chinese with English abstract) [李海奎, 雷渊才, 曾伟生 (2011). 基于森林清查资料的中国森林植被碳储量. 林业科学, 47(7), 7–12.]

Li KR, Wang SQ, Cao MK (2003). Vegetation and soil carbon storage in China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 33, 72–80. (in Chinese) [李克让, 王绍强, 曹明奎 (2003). 中国植被和土壤的碳贮量. 中国科学(D 辑), 33, 72–80.]

Liu GH, Fu BJ, Fang JY (2000). Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance. *Acta Ecologica Sinica*, 20, 733–740. (in Chinese with English abstract) [刘国华, 傅伯杰, 方精云 (2000). 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献. 生态学报, 20, 733–740.]

Liu GS, Jiang NH, Zhang LD, Liu ZL (1996). *Soil Physical and Chemical Analysis Description of Soil Profiles*. China Standard Press, Beijing. 24. (in Chinese) [刘光崧, 蒋能慧, 张连第, 刘兆礼 (1996). 土壤理化分析与剖面描述. 中国标准出版社, 北京. 24.]

Liu QX, Chang J, Jiang B, Yuan WG, Qi LZ, Zhu JR, Ge Y, Shen Q (2005). The biomass of the evergreen broad-leaved ecological public-welfare forests in Zhejiang, East China. *Acta Ecologica Sinica*, 25, 2139–2144. (in Chinese with English abstract) [刘其霞, 常杰, 江波, 袁位高, 戚连忠, 朱锦茹, 葛滢, 沈琪 (2005). 浙江省常绿阔叶生态公益林生物量. 生态学报, 25, 2139–2144.]

Liu SN, Zhou T, Wei LY, Su Y (2012). The spatial distribution of forest carbon sinks and sources in China. *China Science Bulletin*, 57, 943–950. (in Chinese) [刘双娜, 周涛, 魏林艳, 舒阳 (2012). 中国森林植被的碳汇/源空间分布格局. 科学通报, 57, 943–950.]

Lü CQ, Sun SC (2004). A review on the distribution patterns of carbon density in terrestrial ecosystems. *Acta Phytoecologica Sinica*, 28, 692–703. (in Chinese with English abstract) [吕超群, 孙书存 (2004). 陆地生态系统碳密度格局研究概述. 植物生态学报, 28, 692–703.]

Malhi Y, Baldocchi DD, Jarvis PG (1999). The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. *Plant, Cell & Environment*, 22, 715–740.

Norby RJ, Luo YQ (2006). Evaluating ecosystem responses to rising atmospheric CO_2 and global warming in a multi-actor world. *New Phytologist*, 162, 281–293.

Pan YD, Birdsey RA, Fang JY, Houghton R, Kauppi PE, Kurz WA, Phillips OL, Shvidenko A, Lewis SL, Canadell JG, Ciais P, Jackson RB, Pacala SW, McGuire DA, Piao SL, Rqutiainen A, Sitch S, Hayes D (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333, 988–993.

Pan YD, Luo TX, Birdsey R, Hom J, Melillo J (2004). New estimates of carbon storage and sequestration in China's forests: Effects of age-class and method on inventory-based carbon estimation. *Climate Change*, 67, 211–236.

Peng SL, Liu Q (2002). The dynamics of forest litter and its responses to global warming. *Acta Ecologica Sinica*, 22, 1534–1544. (in Chinese with English abstract) [彭少麟, 刘强 (2002). 森林凋落物动态及其对全球变暖的响应. 生态学报, 22, 1534–1544.]

Pope J (2006). How can global warming be traced to CO_2? *Scientific American*, 195(6), 124.

Ren H, Li L, Liu Q, Wang X, Li YD, Hui DF, Jian SG, Wang J, Yang H, Lu HF, Zhou GY, Tang XL, Zhang QM, Wang

D, Yuan LL, Chen XB (2014). Spatial and temporal patterns of carbon storage in forest ecosystems on Hainan Island, southern China. *PLoS ONE*, 9(9), e108163.

Rind D (1999). Complexity and climate. *Science*, 284, 105–107.

Schimel DS (1995). Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global Change Biology*, 1, 77–91.

Simpson LG, Botkin DB, Nisbet RA (1993). The potential aboveground carbon storage of North American forests. In: Wisniewski J, Sampson RN eds. *Terrestrial Biospheric Carbon Fluxes Quantification of Sinks and Sources of* CO_2. Springer, Netherlands. 197–205.

Vitousek PM (1994). Beyond global warming: Ecology and global change. *Ecology*, 75, 1861–1876.

Wang XC, Qi G, Yu DP, Zhou L, Dai LM (2011). Carbon storage, density, and distribution in forest ecosystems in Jilin Province of Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 22, 2013–2020. (in Chinese with English abstract) [王新闯, 齐光, 于大炮, 周莉, 代力民 (2011). 吉林省森林生态系统的碳储量、碳密度及其分布. 应用生态学报, 22, 2013–2020.]

Wang XK, Feng ZW, Ouyang ZY (2001). Vegetation carbon storage and density of forest ecosystems in China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 12, 13–16. (in Chinese with English abstract) [王效科, 冯宗炜, 欧阳志云 (2001). 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究. 应用生态学报, 12, 13–16.]

Watson RT, Noble IR, Bolin B, Ravindranath NH, Verardo DJ, Dokken DJ (2000). *Land Use, Land-Use Change, and Forestry: A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Zeng WS (2005). Research on forest biomass and productivity in Yunnan. *Central South Forest Inventory and Planning*, 24(4), 1–3, 13. (in Chinese with English abstract) [曾伟生 (2005). 云南省森林生物量与生产力研究. 中南林业调查规划, 24(4), 1–3, 13.]

Zhang F, Du Q, Ge HL, Liu AX, Fu WJ, Ji BY (2012). Spatial distribution of forest carbon in Zhejiang Province with geostatistics based on CFI sample plots. *Acta Ecologica Sinica*, 32, 5275–5286. (in Chinese with English abstract) [张峰, 杜群, 葛宏立, 刘安兴, 傅伟军, 季碧勇 (2012). 基于地统计学和CFI样地的浙江省森林碳空间分布研究. 生态学报, 32, 5275–5286]

Zhang J, Ge Y, Chang J, Jiang B, Jiang H, Peng CH, Zhu JR, Yuan WG, Qi LZ, Yu SQ (2007). Carbon storage by ecological service forests in Zhejiang Province, subtropical China. *Forest Ecology and Management*, 245, 64–75.

Zhang J, Yuan WG, Ge Y, Jiang B, Zhu JR, Shen AH, Chang J (2010). Carbon storage and its sequestration potential by ecological service forest in Zhejiang. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 3839–3848. (in Chinese with English abstract) [张骏, 袁位高, 葛滢, 江波, 朱锦茹, 沈爱华, 常杰 (2010). 浙江省生态公益林碳储量和固碳现状及潜力. 生态学报, 30, 3839–3848.]

Zhang MZ, Wang GX (2008). The forest biomass dynamics of Zhejiang Province. *Acta Ecologica Sinica*, 28, 5665–5674. (in Chinese with English abstract) [张茂震, 王广兴 (2008). 浙江省森林生物量动态. 生态学报, 28, 5665–5674.]

Zhang MZ, Wang GX, Liu AX (2009). Estimation of forest biomass and net primary production for Zhejiang Province based on continuous forest resources inventory. *Scientia Silvae Sinicae*, 45(9), 13–17. (in Chinese with English abstract) [张茂震, 王广兴, 刘安兴 (2009). 基于森林资源连续清查资料估算的浙江省森林生物量及生产力. 林业科学, 45(9), 13–17.]

Zhao M, Zhou GS (2004). Carbon storage of forest vegetation and its relationship with climatic factors. *Scientia Geographica Sinica*, 24, 50–54. (in Chinese with English abstract) [赵敏, 周广胜 (2004). 中国森林生态系统的植物碳贮量及其影响因子分析. 地理科学, 24, 50–54.]

Zhou YR, Yu ZL, Zhao SD (2000). Carbon storage and budget of major Chinese forest types. *Acta Phytoecologica Sinica*, 24, 518–522. (in Chinese with English abstract) [周玉荣, 于振良, 赵士洞 (2000). 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. 植物生态学报, 24, 518–522.]

特邀编委: 韩士杰 责任编辑: 王 葳